

報告 簡易性を重視したコンクリートの一軸引張試験方法に関する検討

青木 優介^{*1}・嶋野 慶次^{*2}・飯島 大輔^{*3}・平野 雄大^{*3}

要旨：既報にて提案した、連続繊維シートを応用したコンクリートの一軸引張試験方法のさらなる簡易化と問題点の解決を目的として実験的検討を行った。最初に、連続繊維シートにより供試体を外部より補強する方法はそのままに、供試体を円柱形状とする試験方法について検討した。続いて、連続繊維シートの変わりに硬質塩化ビニル管を用いる試験方法について検討した。最後に、載荷初期の偏心を消去する治具を用いる試験方法について検討した。現段階ではいずれの方法も満足できるレベルには達しておらず、今後の改善が必要である。

キーワード：一軸引張試験, 直接引張試験, 乾燥収縮ひび割れ, 簡易型

1. はじめに

著者らは、コンクリート部材における乾燥収縮ひび割れ予測技術の向上に資するため、乾燥収縮を拘束されたコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に関する一般的事実の解明に取り組んでいる。研究の始点として、理想的な一軸引張条件下における一般的事実の解明を進めている。例えば既報¹⁾において、乾燥収縮ひび割れ現象の主な影響要因である載荷速度と乾燥条件をパラメータとしたコンクリートの一軸引張試験を行い、各々の要因がコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に及ぼす影響について定量的な分析を試みている。

本研究の成果が実際の予測技術に反映されるまでには、より正確かつ広範囲な条件で行われた実験データの蓄積が必要であり、それを可能とする適切かつ簡易な一軸引張試験方法の確立が必要である。既報にて採用した連続繊維シートを応用した一軸引張試験方法²⁾は、領域平均的な引張変形を測定できる長さの試験区間を有する、供試体が高確率で試験区間内で破断する、供試体の作製や載荷が比較的容易である、など適切さと簡易さをある程度備えた試験方法ではあったが、以下の課題が残されていた。

- a) 連続繊維シートの貼り付け作業に手間と時間（接着剤硬化時間を含む）がかかる。
- b) 載荷治具の準備に手間がかかる。ボルト先端の加工³⁾も面倒である。
- c) 供試体が角柱形状である。角柱形状の場合、コンクリート打設面と底面との密実差が、両面の引張変形特性だけでなく、乾燥収縮特性にも相違を生じさせる。また、隅角部は乾燥と応力が集中しやすく、破断の発端になりやすい。
- d) 載荷当初から荷重の偏心が生じる。

本報告では、これらの課題を実験的試行錯誤により解決しようとする過程を紹介する。なお、著者らが確立しようとする一軸引張試験方法は、領域平均的な引張変形の測定を必要とする場合での使用を想定している。これを必要としない場合の一軸引張試験方法については、秋田ら⁴⁾の文献などが参考になる。

2. 連続繊維シートを応用した円柱型一軸引張試験方法に関する検討

2.1 既報の試験方法からの改善点

冒頭に、本報告の2章、3章は既発表の内容であることを記しておく^{5) 6)}。ただし、本報告では

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科講師 工博 (正会員)

*2 木更津工業高等専門学校 技術支援センター (正会員)

*3 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科

これらの内容を系統的に紹介しており、それぞれの考察も発表当時より深めている。

前章の a)~d)に挙げた既報試験²⁾の問題点を一挙に解決することは難しい。まず、連続繊維シートを応用する方法はそのままに、角柱形状だった供試体を円柱形状に変えることとした。同時に、載荷治具の簡素化も試みた。

2.2 試験の概要

(1) 型枠および載荷治具

供試体の型枠を写真-1(a)に示す。型枠は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 圧縮強度試験用型枠を 3 本連結させたものである。載荷治具を固定するため、写真-1(b)の溝型鋼を型枠上下に配している。コンクリートは、上部溝型鋼を外して打設する。適当な高さまでの充填を確認すれば、上部溝型鋼ごと載荷治具を押し込んで固定する。

載荷治具を写真-1(c)示す。 $\phi 100 \times 30\text{mm}$ の鋼板の中心に孔を開け、荷重伝達用の $\phi 16\text{mm}$ 寸切りボルト 1 本を通した構造である。ボルト先端部の特別な加工³⁾は行っていない。

(2) 供試体

載荷中の供試体を写真-2に示す。試験区間は中央部の 200mm になる。その両端からそれぞれ 50mm の間隔をあけ、載荷治具鋼板の側面を含める形で連続繊維シートを貼り付けている。シートの貼り付け法は既報²⁾と同様である。円柱形状なのでスムーズに貼り付けることができる。

(3) 荷重とひずみの測定

荷重は載荷試験機のロードセルで測定する。試験区間のひずみは、断面の 3 等分点 (120° 毎) に軸方向に貼り付けた長さ 60mm ひずみゲージにより測定する。載荷速度は 0.1kN/s とする。載荷初期の偏心の発生を軽減するため、供試体と試験機の接続点をヒンジ構造としている。

(4) 使用したコンクリート

試験には、W/C=50%の早強セメントコンクリートを用いた。供試体は 3 本作製し、試験日の材齢 5 日まで、室温 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ の恒温室内にて封かん養生とした。途中、材齢 2~3 日において、連続繊維シートの貼り付け作業を行った。

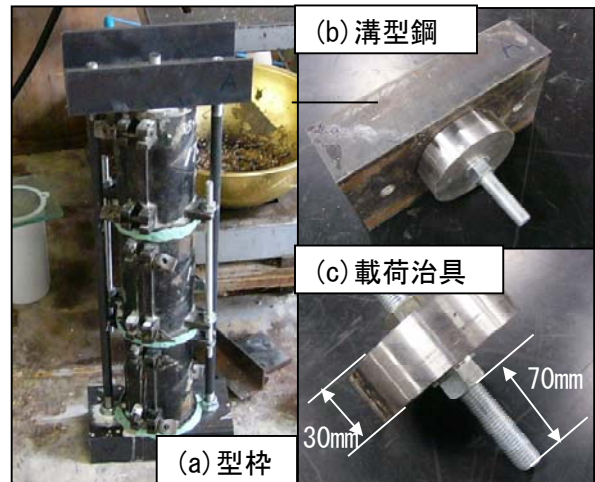


写真-1 供試体の型枠と載荷治具

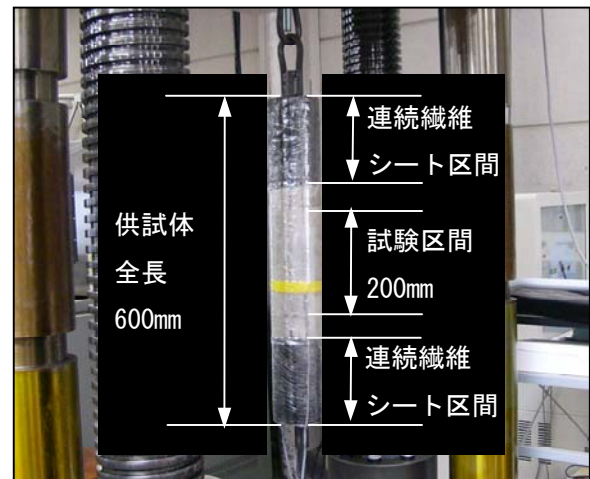


写真-2 載荷中の供試体

2.3 試験結果

本節では、供試体の破断性状のみを報告する。試験区間の引張応力-ひずみ関係からは供試体に生じる偏心の程度を判断することができるが、このことについては後述の 4.1 節で説明する。

供試体 3 本中 2 本が試験区間内で破断した。破断状況を写真-3に示す。残りの 1 本には、明確な破断が確認できないまま荷重の抜けが生じた。この原因について考察した。

当初、供試体は連続繊維シート区間内で破断したと考え、シートを削って内部を確認したが、ひび割れは生じていなかった。次に、荷重を伝える埋込ボルトとコンクリートとの付着が不足していたと考え、埋込ボルト先端に写真-4(a)のようにナットを付け、同様に試験を行った。

その結果、供試体には、再び破断しないままの荷重抜けが生じた。調べると、**写真-4(b)**のように、コンクリート端部に割裂ひび割れが生じていた。このことから、供試体が破断しないまま荷重の抜けが生じた原因は、埋込ボルトとコンクリートとの付着不足にあるのではなく、むしろ強力な付着応力の集中により、コンクリートが割裂することにあると考えた。

2.4 本試験方法の完成度と課題

供試体を円柱形状に変更した。課題は、スムーズになったとはいえ依然連続繊維シートの貼り付けに手間がかかること、付着応力の集中によりコンクリートが割裂すること、荷重の偏心を消去できていないことである。

3. 硬質塩化ビニル管を応用した円柱型一軸引張試験方法に関する検討

3.1 前試験方法からの改善点

供試体を円柱形状に変更したことにより、連続繊維シート以外の補強材の適用が可能となる。補強材はφ100mmの円柱に貼り付け可能であり、ある程度剛性を有するものであればよい。ここでは、軽さ、入手し易さ、試験後の処理し易さなどを考慮して、硬質塩化ビニル管を用いることにした。また、これを貼り付ける接着剤として、15分程度で硬化するエポキシ系接着剤を用いることにした。以上の変更により、連続繊維シートでは最低2日間を要していた補強作業の時間を大幅に短縮することができた。

付着応力の集中によるコンクリートの割裂については、埋込ボルトの本数を1本に減じたことによる影響が大きいと考えた。ここでは、埋込ボルトの本数を既報の試験²⁾と同数の4本に戻すことで付着応力の分散を狙った。

3.2 試験の概要

(1) 型枠および载荷治具

型枠は**写真-1(a)**と同様である。载荷治具を**写真-5**に示す。φ100×30mm鋼板の中心に孔をあけ、試験機と連結させるφ20mm寸切りボルトを1本通している。中心から半径30mmの円



写真-3 供試体の破断状況

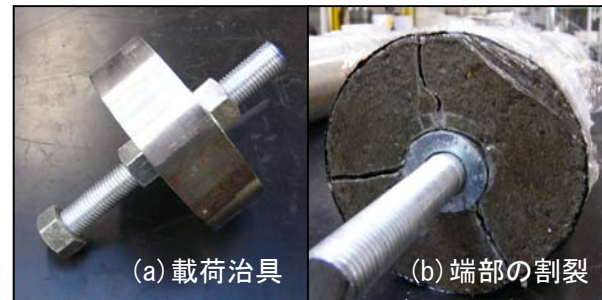


写真-4 ナットを付けた治具と供試体端部の割裂状況

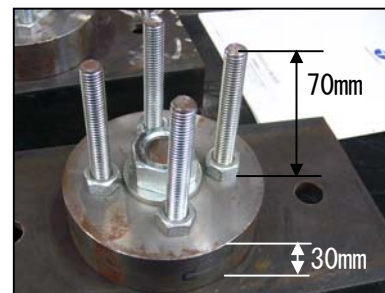


写真-5 载荷治具

周上にあけた4点の孔には、埋込ボルトとしてφ10mm寸切りボルトを4本配している。埋込む深さは、固定用のナットを含めて70mmである。ボルト先端の特別な加工³⁾は行っていない。

(2) 供試体

载荷中の供試体を**写真-6**に示す。形状は2章の供試体(**写真-2**)と同様である。荷重伝達部の補強材を硬質塩化ビニル管に変更している。

硬質塩化ビニル管にはJIS VP100(内径100mm、最小厚さ6.6mm)を用いた。貼り付け手順を以下に説明する。VP100を長さ150mmに切断し、さらに縦方向に2分割にしておく。供試体脱枠後、载荷治具鋼板の側面と供試体外周面をアセトンで清掃し、内面にエポキシ系接着剤を塗ったVP100を、供試体を左右から挟むように接着

する。その後、直ちに VP100 の外周をスチール製のリングで締め付け、接着剤の硬化を待つ。以上の作業は、供試体 3 本であれば 1~2 時間程度で終わらせることができる。

(3) 荷重とひずみの測定

2 章の試験と同じである。説明は割愛する。

(4) 使用したコンクリート

試験には、材齢 1 日の W/C=55% の普通コンクリートと材齢 57 日の W/C=35% の普通コンクリートを用いた。供試体はともに 3 本ずつ作製し、いずれも試験日まで室温 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ の恒温室内にて封かん養生とした。

3.3 試験結果

ここでも供試体の破断性状のみを報告する。試験区間の引張応力-ひずみ関係については、後述の 4.1 節で説明する。

材齢 1 日の W/C=55% の供試体では、3 本中 1 本が試験区間で破断したものの、他の 2 本は写真-7(a)のように補強部近傍にて破断した。写真-7(a)の供試体の引張強度は約 0.4N/mm^2 、静弾性係数は約 10000N/mm^2 であった。

材齢 57 日の W/C=35% の供試体では、3 本全てが写真-7(b)のように試験区間で破断した。写真-7(b)の供試体の引張強度は約 2.3N/mm^2 、静弾性係数は約 30000N/mm^2 であった。

材齢 1 日の W/C=55% の供試体に生じた補強部近傍の破断は、補強部と無補強部の剛性差に起因する応力集中が原因だと考えられる。応力集中は、写真-7(b)供試体の程度まで引張強度あるいは静弾性係数が発現したコンクリートの破断には影響しないようだが、それ以下の場合には破断に影響する可能性が高い。

3.4 本試験方法の完成度と問題点

引張強度が 2.0N/mm^2 程度、静弾性係数が 30000N/mm^2 程度まで発現した供試体では、良好な破断性状を得ることができた。また、いずれの供試体にもコンクリート端部の割裂は生じなかった。埋込ボルトを 4 本に増やしたことにより、付着応力が適当に分散されたと考えられる。課題は、荷重の偏心を消去することである。

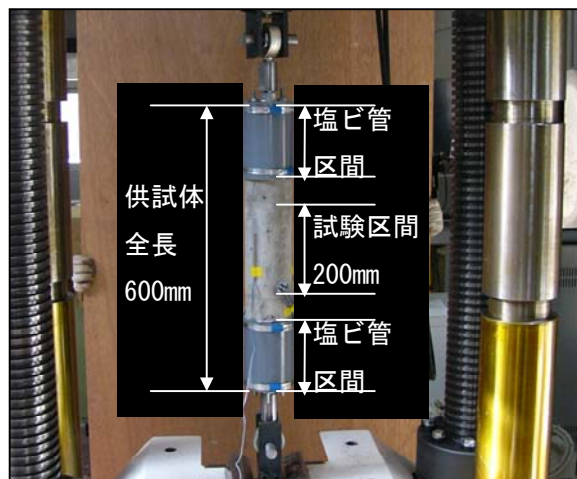


写真-6 載荷中の供試体

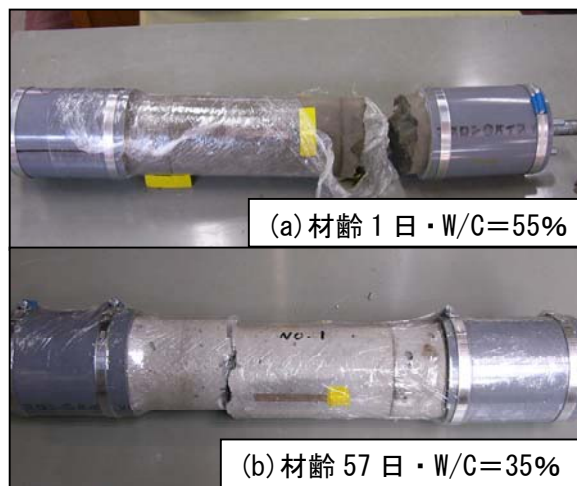


写真-7 供試体の破断状況

4. 載荷初期の偏心を消去できる治具を用いた円柱型一軸引張試験方法に関する検討

4.1 前試験方法からの改善点

2 章の試験より得られた供試体の引張応力-ひずみ関係の一例を図-1 に示す。3 章の試験より得られる引張応力-ひずみ関係も基本的にはこれと変わらない。円形断面の 3 等分点で測定されたひずみには、載荷当初から一定の割合で差が生じている。つまり、供試体には載荷当初から荷重の偏心が生じており、それが最後まで一定の割合で継続していると考えられる。

荷重の偏心は、載荷軸中心のズレや載荷治具の微妙な傾斜などにより生じると考えられる。本試験においても、他の一軸引張試験と同様に、供試体と試験機の接続点をヒンジにしているが、それだけで偏心は消去しきれないようである。

著者らは、荷重の偏心が荷重当初から一定の割合で続いていることに着目した。荷重初期の段階で荷重の偏心を消去すれば、2次曲げは別として⁴⁾、最後まで偏心のない荷重が可能になると考えた。そして、それを実現すべく簡単な荷重治具を作製した(写真-8(b))。具体的な消去方法は後述するが、本治具を用いれば簡単な作業で荷重初期の偏心を消去することができる。

もう一つ大きく変更した点は、荷重の伝達を埋込ボルト式から接着剤式にしたことである。これによって埋込ボルトの作製と準備、そして、コンクリート打設後の上部荷重治具の押し込み作業が不要になる。さらに、供試体にボルトを埋め込む区間が無くなったことから、供試体を短くすることができ、供試体の軽量化、型枠の簡易化を実現することができる。

4.2 試験の概要

(1) 供試体の作製

型枠は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の使い捨て型枠を上下に連結させたものである(写真-8(b))。上型枠の底板を取り外せばコンクリートを打設できる。

脱枠後、供試体の両端面を研磨機で研磨する。研磨面にはエポキシ接着剤を塗り、写真-8(c)に示す荷重治具の下鋼板($\phi 100 \times 30\text{mm}$ 鋼板)を接着する。その後、接着した鋼板の側面と供試体の外周面をアセトンで清掃し、供試体を挟むように硬質塩化ビニル管を接着する。

荷重時の供試体を写真-8(a)に示す。供試体中央部の200mmが試験区間となる。

(2) 荷重の偏心の消去

荷重の偏心は、荷重治具の上下鋼板をつなぐ3本のボルトを微調整することにより消去する。調整の基準となるのは、ボルト軸の延長線上の試験区間に貼り付けた3本のひずみゲージの値である。荷重初期の段階において、荷重を一時ストップし、3点のひずみ値が同等になるように、3本のボルトをスパナ等で微調整する。

(3) 使用したコンクリート

試験には、W/C=40%の普通コンクリートを用いた。試験日の材齢は7、28日とし、それぞれ

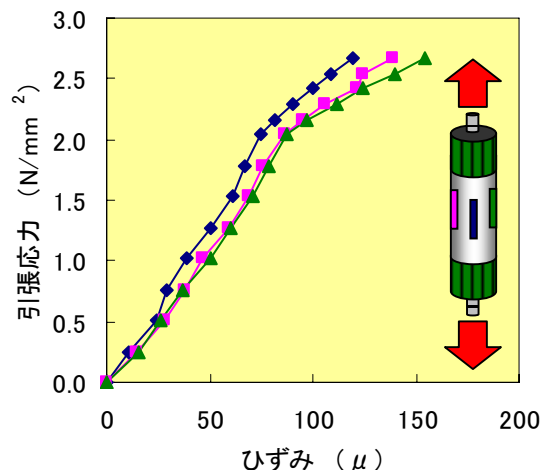


図-1 引張応力-ひずみ関係の一例

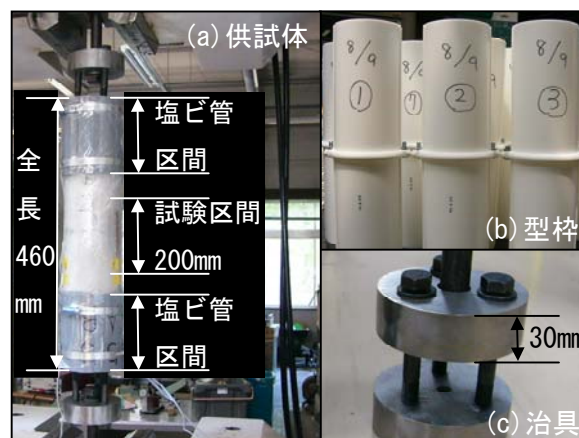


写真-8 荷重中の供試体、型枠、荷重治具

3本の供試体を作製した。供試体は、試験日まで $25 \pm 2.0^\circ\text{C}$ の室内で封かん養生とした。両材齢における当該コンクリートの割裂引張強度は、それぞれ 2.91N/mm^2 、 3.03N/mm^2 であった。

4.3 試験結果

材齢7、28日の供試体の典型的な破断状況をそれぞれ写真-9(a)(b)に示す。材齢7日の供試体は、3本ともコンクリート区間で破断したが、そのいずれもが補強部付近で生じていた。破断時の応力は約 2.5N/mm^2 であった。材齢28日の供試体は、3本中2本が鋼板の剥離により破断した。破断後の鋼板には剥離したモルタルが付着していた。破断時の応力は約 2.8N/mm^2 であった。以上の結果から、本試験では、補強部近傍の応力集中による破断が生じやすいこと、 2.8N/mm^2 以上の引張強度を持つコンクリートへの適用は難しいことが明らかとなった。

材齢 7 日の供試体より得られた引張応力-ひずみ関係の一例を図-2 に示す。荷重当初に生じた偏心が、荷重治具ボルトの調整によって消去されていることがわかる。しかし、その効果は一時的なものであり、荷重を継続すると再び偏心が生じている。偏心が生じる度に消去作業を行えば完全に消去できるだろうが、ボルト調整が可能な荷重レベルには限界がある。

4.4 本試験方法の完成度と問題点

破断性状、偏心の消去ともに期待した成果は得られなかった。今後の課題としたい。

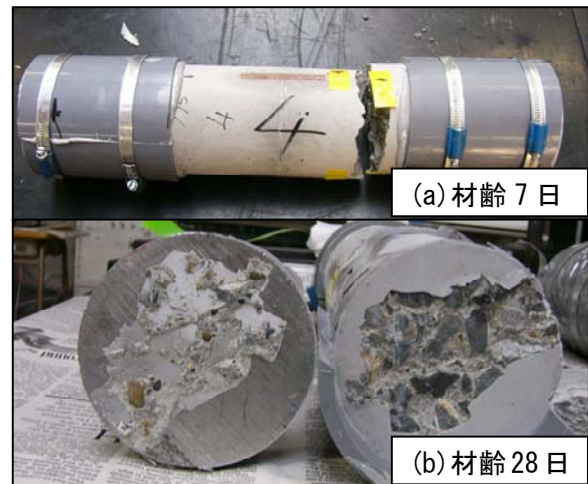


写真-9 供試体の破断状況

5. まとめ

- (1) 連続繊維シートを応用した円柱型一軸引張試験方法について検討した。供試体を円柱形状に変えることができた。シートの貼り付け作業、付着応力の集中によるコンクリートの割裂、偏心の消去に課題を残した。
- (2) 硬質塩化ビニル管を応用した円柱型一軸引張試験方法について検討した。引張強度や静弾性係数がある程度発現したコンクリートでは、良好な破断性状を得ることができた。依然、偏心の消去に課題を残した。
- (3) 荷重初期に偏心を消去できる治具を用いた円柱型一軸引張試験方法について検討した。型枠を簡易化できたものの、良好な破断性状は得られず、偏心の消去も一時的であった。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（若手研究(B)17760366）に基づいて行われています。

参考文献

- 1) 青木優介, 下村 匠: 乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリート引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.135-148, 2003.5
- 2) 青木優介, 下村 匠: 連続繊維シートを応用したコンクリートの一軸引張試験方法の開発, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.273-278,

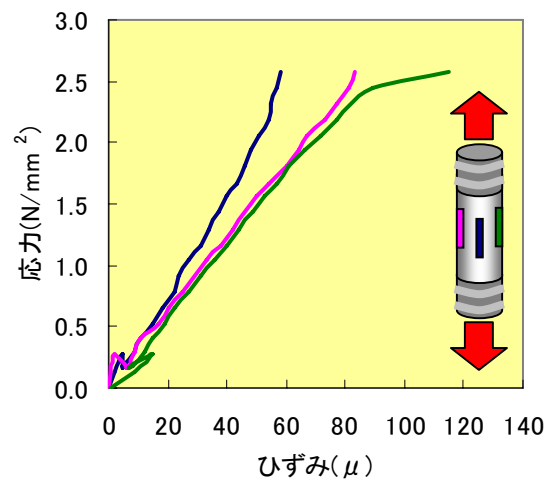


図-2 荷重初期で偏心を消去した供試体の引張応力-ひずみ関係

2003.8

- 3) 吉本 彰ほか: 純引張試験用コンクリート供試体に関する研究, セメント技術年報, Vol.32, pp.231-234, 1978
- 4) 秋田 宏ほか: コンクリートの直接引張試験方法における4つの誤解, コンクリート工学論文集, 第16巻, 第1号, pp.77-85, 2005.1
- 5) 豊島 岳ほか: 連続繊維シートを応用した円柱型一軸引張試験方法の開発, 第31回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2004.3
- 6) 福田 智也ほか: 若材齢での荷重に対応した簡易型一軸引張試験方法の開発, 第32回土木学会関東支部技術研究発表講演概要集, CD-ROM, 2005.